

УДК 620.179.14

*С. Н. МЕШКОВ, Р. П. ОРЕЛ***ФАКТОРЫ, СНИЖАЮЩИЕ ДОСТОВЕРНОСТЬ ТЕПЛОВИЗИОННОЙ ДИАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВОДОВ АГРЕГАТНЫХ ЗАЛОВ АЭС**

Рассмотрены результаты тепловизионного обследования паропроводов высокого давления и основного конденсата атомной станции. Указаны условия и методика проведения тепловизионного контроля отдельных участков трубопроводов. Проанализированы внешние факторы, затрудняющие выявление внутренних скрытых дефектов (влияние освещения, цилиндрической формы объектов, мощных внешних источников тепла). Обнаружено, что кавитационные дефекты имеют «тепловой след». Предложено применение тепловидения как эффективного метода экспресс-контроля, позволяющего быстро определять по температурным аномалиям места для детального изучения другими методами неразрушающего контроля.

**Ключевые слова:** тепловидение, паропроводы высокого давления, трубопроводы основного конденсата, кавитационная эрозия, скрытые дефекты.

*С. М. МЕШКОВ, Р. П. ОРЕЛ***ФАКТОРИ, ЯКІ ЗНИЖУЮТЬ ДОСТОВІРНІСТЬ ТЕПЛОВІЗІЙНОЇ ДІАГНОСТИКИ ТРУБОПРОВОДІВ АГРЕГАТНИХ ЗАЛІВ АЕС**

Розглянуті результати тепловізійного обстеження паропроводів високого тиску та основного конденсату атомної станції. Указані вимоги та методика проведення тепловізійного контролю окремих частин трубопроводів. Проаналізовані зовнішні фактори, які перешкоджають вияву внутрішніх схованих дефектів (вплив освітлення, циліндричної форми об'єктів, вплив потужних зовнішніх джерел тепла). Виявлено, що кавітаційні дефекти мають «тепловий слід». Запропоновано використання тепловачення як ефективного експрес-методу, який дозволяє швидко виявляти по температурним аномаліям місця для детального вивчення іншими методами неруйнівного контролю.

**Ключові слова:** тепловачення, паропроводи високого тиску, трубопроводи основного конденсату, кавітаційна ерозія, сховані дефекти.

*S. N. MESHKOV, R. P. OREL***FACTORS THAT REDUCE THE RELIABILITY OF THERMOGRAPHIC EXAMINATION OF PIPELINES IN NUCLEAR POWER PLANT**

The results of thermographic examination of high pressure steam lines and main condensate pipelines of nuclear power plant are considered. The conditions and technique of thermographic examination of particular parts of pipelines are described. Qualitative features and quantitative characteristics of external factors, which make it difficult to identify internal hidden defects, have been analyzed. These factors are lighting, cylindrical shape of objects, powerful external heat sources. It was found, that cavitation defects have a "heat trace". A hidden defect having a cavitation nature has been revealed, and the signs of its identification are described. The presence of detected defect is confirmed by the standard ultrasound method. Thermographic examination was proved to be an effective express-control method for quickly determining by temperature anomalies the localities for a detailed study which must be carried out by other methods of non-destructing control. The background of thermal testing the pipelines of nuclear power plant aggregate halls are laid. It is suggested to introduce thermal testing in the list of standard test procedures in nuclear power plants.

**Keywords:** thermography, high pressure steam lines, main condensate pipelines, cavitation, hidden defects.

**Введение.** В процессе эксплуатации конструкционные материалы, применяемые в энергетике, изменяют свои свойства, что является причиной появления дефектов, которые могут привести к техногенным авариям. Применение контактных диагностирующих приборов не всегда возможно вследствие габаритов объектов контроля или трудностей доступа к ним.

Механические и термические нагрузки, которые испытывает трубопроводное оборудование тепловых и атомных станций, ведут к снижению термического сопротивления металла. Поэтому температура является важнейшим диагностическим показателем.

Трудоемкость обследований можно существенно снизить при применении тепловидения. В настоящее время существует достаточное количество моделей тепловизоров для решения задачи дистанционного диагностирования технического состояния трубопроводного оборудования. При регулярном термографическом мониторинге путем сравнения результатов можно оценить состояние объекта, выявить дефектные участки и наметить пути их устранения.

В мировой атомной энергетике программы

технического обслуживания АЭС предусматривают до 50 тыс. тестовых процедур, среди которых возрастает роль тепловизионного мониторинга. В США тепловизионный метод применяется на всех АЭС. Есть сведения о применении тепловизионного метода на ряде российских АЭС [1]. В отечественной энергетике тепловизионный метод пока применения не нашел.

Целью работы являлось определение возможности применения тепловидения для обнаружения скрытых дефектов металла трубопроводов.

**Методика и условия обследования.** С точки зрения проведения тепловизионной съемки трубы представляют сложный объект. Даже при равномерно нагретой трубе и однородном состоянии ее поверхности возникают эффекты, обусловленные ее сферической формой [2], что значительно усложняет как идентификацию скрытых дефектов, так и их количественную оценку [3,4].

Термографическое обследование проводилось на участках трубопроводов при следующих условиях:

- без контакта с контролируемым объектом;
- без механической подготовки поверхности;
- при рабочих параметрах оборудования.

Обследование проводилось в производственных помещениях при температуре 30 °С. Освещение производственных помещений соответствовало общим принципам, основным из которых является создание равномерного уровня освещенности на всей площади. Уровень освещенности учитывался как шумовая составляющая радиационной температуры и на исследуемых объектах составлял 1,5...2,0 °С.

Для привязки результатов тепловизионного обследования к конкретным объектам в тех же ракурсах проводилась видеорегистрация. Во время исследования также измерялась температура окружающего воздуха вблизи объектов контроля.

Обследования регламентировались техническими требованиями на проведение работ «Контроль металла трубопроводов и оборудования энергоблоков методом тепловой термографии» от 02.10.2007г.

Места тепловизионной съемки были выбраны согласно схеме, составленной по различным видам износа металла рабочего тракта ТУ К-220-44, которая являлась условной картой, полученной на основе опыта эксплуатации турбоустановок насыщенного пара.

Обследование металла выполнялось в соответствии с ПНАЭ Г-7-008-89 "Правила устройства и безопасной эксплуатации оборудования и трубопроводов атомных энергетических установок", а

также на основании документации на тепловой метод контроля, результатов научных исследований и опыта работы НТЦ «Термоконтроль».

**Результаты исследований паропроводов высокого давления.** Большой практический интерес представляет обнаружение скрытых дефектов в паропроводах высокого давления. Обследование открытых участков дает положительные результаты: по характеристикам стационарного температурного поля на поверхности можно оценить величину утонения металла в месте дефекта [5]. Однако, согласно действующим на тепловых станциях нормам паропроводы высокого давления покрыты рубашкой из теплоизоляции (стекловата) и помещены в защитный металлический экран. Металлические экраны часто имеют неровную, волнистую поверхность. Температурные градиенты такой поверхности создают на термограммах набор локальных тепловых аномалий (рис. 1).

На фрагменте объекта с гладкой поверхностью был выявлен участок с предполагаемым дефектом. Признаком развивающегося внутреннего дефекта является температура и площадь тепловой аномалии (рис. 2).

Температурные характеристики выявленной тепловой аномалии показаны в табл. 1.

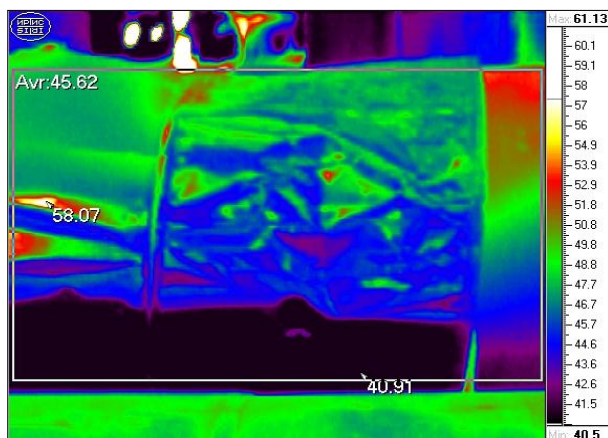


Рис. 1 – Локальные тепловые аномалии, вызванные рельефом поверхности защитного экрана

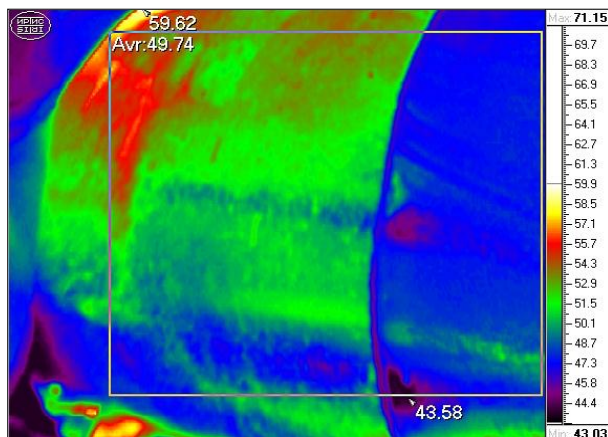


Рис. 2 – Участок паропровода высокого давления с возможным развивающимся дефектом



Таблица 1 – Температурные характеристики выявленного дефекта сварного шва

Номер объекта	Площадь, см <sup>2</sup>	$T_{avr}$	$T_{avr}, ^\circ\text{C}$ (о́круж. области)	$\Delta T, ^\circ\text{C}$ ( $T_{max} - T_{avr}$ )
4	260	57,1	50,5	7,0

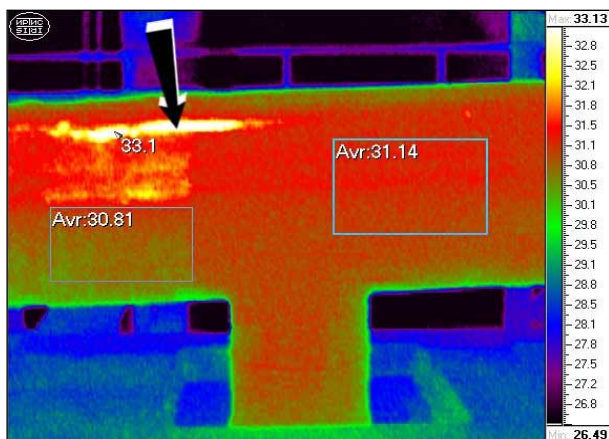
При термографировании выявлен эффект «тепловой засветки» или наложения тепловых полей. Температурные поля зависят от взаимного расположения объектов телевизионной съемки, что необходимо учитывать при выборе ракурса съемки.

В ходе работ было обследовано 6 фрагментов паропроводов высокого давления. Для объектов данного вида, работающих в штатном режиме, теплоизоляция сильно ослабляет и искажает температурные поля труб. Поэтому тепловизионным методом обнаруживать скрытые дефекты можно только на заключительных стадиях их развития.

**Результаты исследований трубопроводов основного конденсата.** Гидротехническое оборудование подвержено кавитационной эрозии. Кавитационная эрозия обусловлена явлением, возникающим в движущемся потоке жидкости при определенных гидравлических условиях. Эрозионное разрушение поверхности при кавитации происходит вследствие многократно повторяющихся гидравлических ударов струй жидкости о поверхность. На рис. 3 показан фрагмент трубопровода с дефектом, обусловленным кавитационным износом.



Рис. 3 – Фрагмент трубопровода с кавитационной каверной (дефектом)



Согласно экспериментальным фактам скорость кавитационного разрушения металла в 5000–10000 раз превосходит скорость коррозионного разрушения. Хотя общепринятой теории кавитации не существует, но по некоторым оценкам пики давлений при сжатии (или разрушении) кавитационных каверн доходят до 250 МПа, а температура – до  $10^4$  К [6–8]. Из этого следует, что места образования кавитационных каверн являются локализованными источниками повышенной температуры, и кавитация может иметь «тепловой след».

Это предположение нашло подтверждение при обследовании трубопроводов основного конденсата с температурой носителя около  $40^\circ\text{C}$ . Поверхности исследованных труб были равномерно покрашенными и гладкими, что приближало их по излучательным свойствам к ламбертовым излучателям.

На результаты тепловизионной съемки в закрытых помещениях, когда температура объекта соизмерима с температурой окружающего воздуха, большое влияние оказывают внешние факторы. В результате их действия на поверхности объектов формируются зоны с мнимой («наведенной») температурой, которая не соответствует реальной радиационной температуре объекта. Кроме количественных температурных различий такие наведенные аномалии имеют и отличительные качественные признаки. Были выявлены и изучены следующие виды факторов, влияющих на температурные поля объектов:

- влияние освещения;
- влияние формы поверхности объекта;
- влияние мощных внешних тепловых излучателей;
- влияние теплообмена объекта с полом помещения.

На рис. 4–7 показаны характерные температурные аномалии, вызванные перечисленными факторами.

Результаты проведенного анализа показаны в таблице 2. В результате исследований было выявлено несколько объектов, которые имеют скрытые дефекты. На рис. 8 показан фрагмент трубопровода с выявленной зоной кавитационной эрозии.





Рис. 4 – Форма аномальной температурной зоны, вызванной влиянием освещения

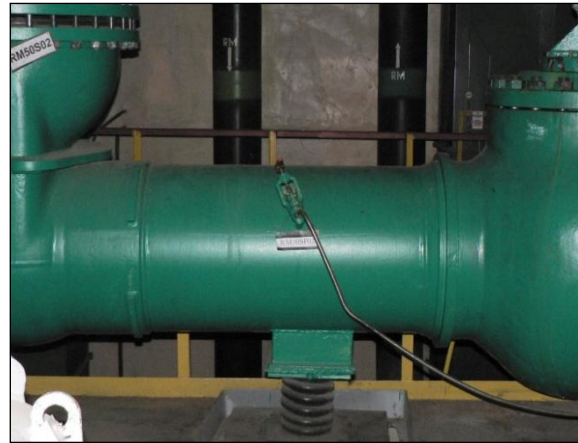
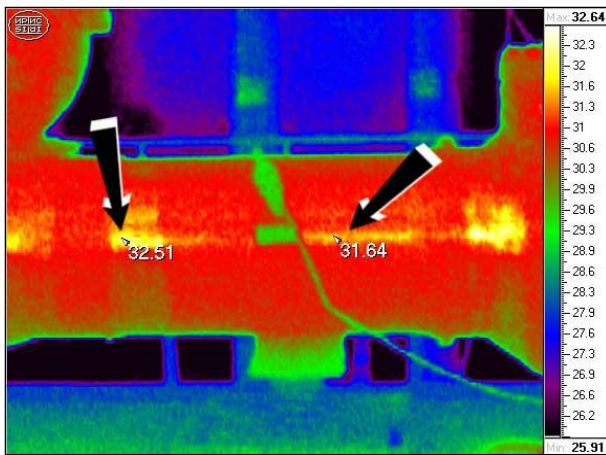


Рис. 5 – Аномальные температурные участки, вызванные кривизной объекта

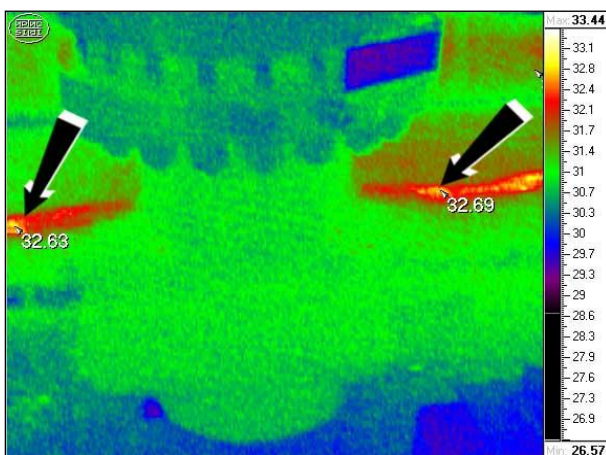


Рис. 6 – Влияние мощного внешнего теплового источника

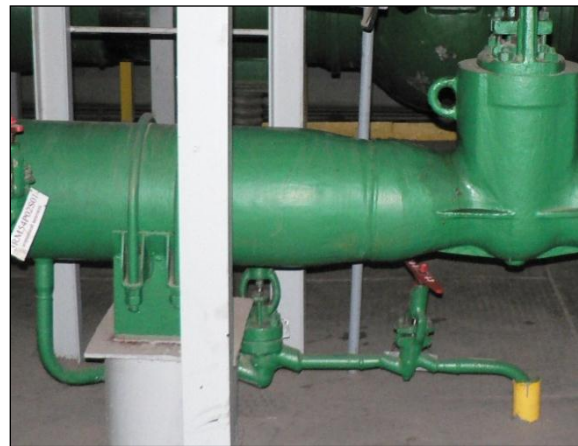
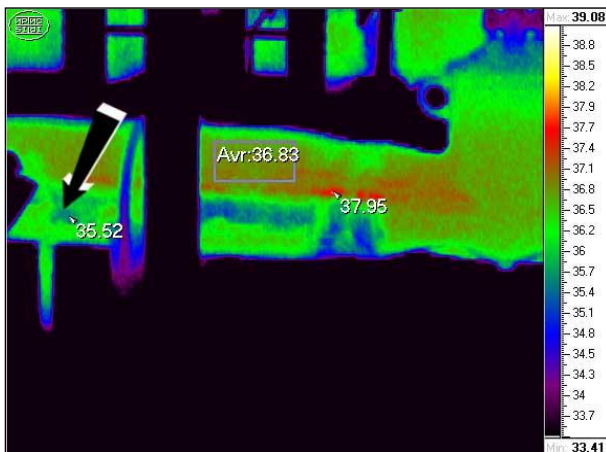


Рис. 7 – Влияние теплообмена объекта с полом помещения

Дефект был обнаружен по следующим признакам:

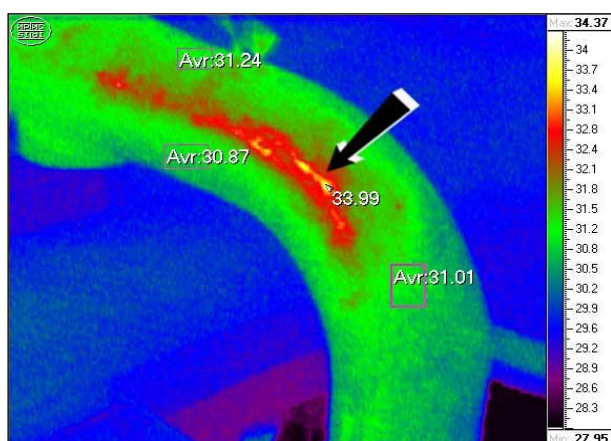
- форма дефектной зоны не носит регулярный характер и отличается от температурных искажений, вызываемых изученными внешними факторами;
- положение дефекта не меняется при смене ракурса съемки (рис. 8, а–б);
- максимальная температура дефекта отличается от средней температуры остальной части трубы на

2,6 °C, что превышает уровни других температурных аномалий (см. табл. 2).

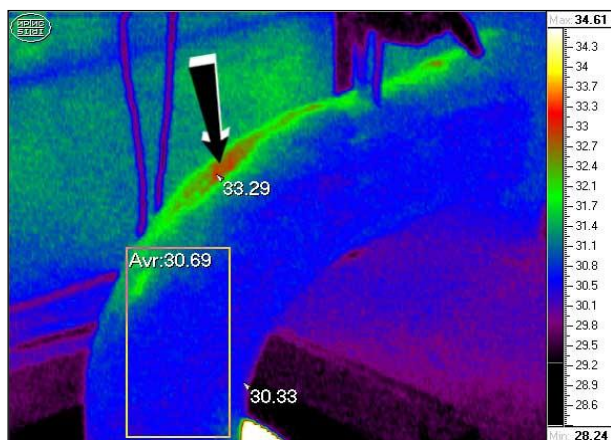
В подтверждение факта выявления говорит то, что обнаруженный дефект находится на повороте трубопровода, где происходит резкое торможение потока конденсата, а такие места являются наиболее вероятными для возникновения кавитационных каверн. Полученный результат был подтвержден данными ультразвукового контроля.

Таблица 2 – Качественные и количественные оценки влияния различных факторов

N	Фактор	Качественные отличия, особенности	Уровни температурных аномалий
1	Освещение	Форма участков с минимой температурой повторяет форму бликов от внешних источников света. Температурные аномалии имеют характерное положение и зависят от расположения источников света.	1,6–1,9 °C
2	Влияние цилиндрической формы поверхности объекта.	Температурные аномалии имеют регулярный характер и положение по центру объекта. Нижняя часть трубы имеет, как правило, более низкую температуру.	1,0–1,7 °C
3	Влияние мощных внешних тепловых излучателей	Вблизи мощных тепловых источников на объекте контроля в верхней части появляется узкая зона с повышенной температурой. Температурная аномалия имеет характерную форму и положение. Часто тепловой источник попадает в кадр.	0,9–1,8 °C
4	Влияние теплообмена объекта с полом помещения	Нижняя часть трубы (до осевой) имеет более низкую температуру. Температурные аномалии имеют четко выраженный характер и положение.	0,5–1,0 °C
5	Дефект	Форма дефектной зоны не носит регулярный характер, ее положение не меняется при смене ракурса съемки.	2,7 °C



а



б

Рис. 8 – Зона кавитационной эрозии (дефект утонения стенки трубы), зарегистрированная в разных ракурсах (а–б).

**Выводы.** Проведенные исследования дали положительный результат и показали перспективность применения тепловидения для определения состояния металлов в трубопроводах на тепловых и атомных станциях.

Для прогнозирования сроков эксплуатации трубопроводов необходимы точные значения уменьшения толщины труб, которые можно получить с помощью контактного ультразвукового метода. Проанализированные внешние факторы затрудняют получение точных количественных оценок, которые необходимы для прогнозирования остаточного ресурса объектов. Тепловидение дает возможность быстрого получения информации о наличии несоответствий состояния металла в предпусковой период после планово-предупредительных ремонтов и в период эксплуатации.

Место тепловидения можно определить как экспресс-контроль, позволяющий быстро устанавливать по температурным аномалиям области для детального изучения другими, более точными методами. Это позволит экономить время, повысит качество и оперативность контроля. Тепловизионный мониторинг позволит определять участки первоочередных исследований с целью оптимизации объема контроля (планирование объемов и сроков ремонта оборудования и трубопроводов по их фактическому состоянию).

Закономерности явления кавитации и меры борьбы с ней до настоящего времени мало изучены, и поэтому задача эффективного обнаружения кавитационных каверн в гидрооборудовании является очень важной. Использование акустического метода диагностирования кавитационных дефектов в элементах проточной части гидросистем нецелесообразно, так как требует больших затрат времени. Поэтому обнаружение «теплого следа» кавитационной эрозии является важным результатом.

#### Список литературы

1. Вавилов В. П. Инфракрасная термография и тепловой контроль. Москва: Спектр, 2009. 544 с.

2. Xavier P. V. Maldague. Theory and Practice Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York, JohnWiley&Sons INC, 2001. 684 p.
3. Стороженко В. А., Мешков С. Н., Гаптракипов А. А. Тепловизионное моделирование процессов выявления дефекта в объектах цилиндрической формы при тепловом неразрушающем контроле. Техническая диагностика и неразрушающий контроль, 2004. №4. С. 37–40.
4. Стороженко В. А., Мягкий А. В., Сапрыкин С. А., Мешков С. Н. Применение термографического метода контроля для определения содержания жидкой фазы в газопроводах. Методы та прилади контролю якості, 2009. № 23. С. 12–15.
5. Мешков С. Н., Малик С. Б., Мягкий А. В. Оценка возможности применения тепловизионного метода для обнаружения дефектов в напорных трубопроводах. Сборник докладов 6-й межд. НТК «Метрология и измерительная техника». Харьков, ННЦ «Институт метрологии», 2008. С. 154–157.
6. Неведов Ю. И., Стороженко В. А., Брагин С. С. Кавитационный энергосберегающий теплогенератор – гидротаран. Энергетика. Энергосбережение. Энергоаудит, 2011. № 5. С. 9–14.
7. Пирсол И. Кавитация. Москва: Мир, 1975. 96 с.
8. Богачев И. Н. Кавитационное разрушение и кавитационные сплавы. М.: Металлургия, 1972. 192 с.

#### References (transliterated)

1. Vavilov V. P. Infekrasnaja termografija i teplovoj kontrol'. Moscow: Spektr, 2009. 544 p.
2. Xavier P. V. Maldague. Theory and Practice Infrared Technology for Nondestructive Testing. New York, JohnWiley&Sons INC, 2001. 684 p.
3. Storozhenko V. A., Meshkov S. N., Gaptrakipov A. A. Teplofizicheskoe modelirovanie processov vyjavlenija defekta v ob'ekтах cilindricheskoj formy pri teplovom nerazrushajushhem kontrole. Tehnicheskaja diagnostika i nerazrushajushhij kontrol', 2004.No 4. pp. 37–40.
4. Storozhenko V. A., Mjagkij A. V., Saprykin S. A., Meshkov S. N. Primenenie termograficheskogo metoda kontrolja dlja opredelenija soderzhanija zhidkoj fazy v gazoprovodah. Metodi ta priladi kontrolju jakosti, 2009. № 23. pp. 12–15.
5. Meshkov S. N., Malik S. B., Mjagkij A. V. Ocenka vozmozhnosti primeneniya teplovizionnogo metoda dlja obnaruzhenija defektov v napornyh truboprovodah. Sbornik dokladov 6-j mezhd. NTK «Metrologija i izmeritel'naja tehnika». Kharkov, NNC «Institut metrologii», 2008. pp. 154–157.
6. Nefedov Ju. I., Storozhenko V. A., Bragin S. S. Kavitationnyj jenergosberegajushhij teplogenerator – gidrotaran. Jenergetika. Jenergosberezhenie. Jenergoaudit, 2011.No 5. pp. 9–14.
7. Pirsol I. Kavitacija. Moscow: Mir, 1975. 96 p.
8. Bogachev I. N. Kavitacionnoe razrushenie i kavitacionnye splavy. M.: Metallurgija, 1972. 192 p.

Поступила (received) 15.05.2018

#### Відомості про авторів / Сведения об авторах / About the Authors

**Мешков Сергій Миколаєвич (Мешков Сергей Николаевич, Meshkov Sergiy Mikolayovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3464-8318>; e-mail: [sergiy.meshkov@nure.ua](mailto:sergiy.meshkov@nure.ua)

**Орел Роман Петрович (Орел Роман Петрович, Orel Roman Petrovych)** – кандидат технічних наук, доцент, Харківський національний університет радіоелектроніки, доцент кафедри фізики; м. Харків, Україна; ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3592-2393>; e-mail: [roman.orel@nure.ua](mailto:roman.orel@nure.ua)